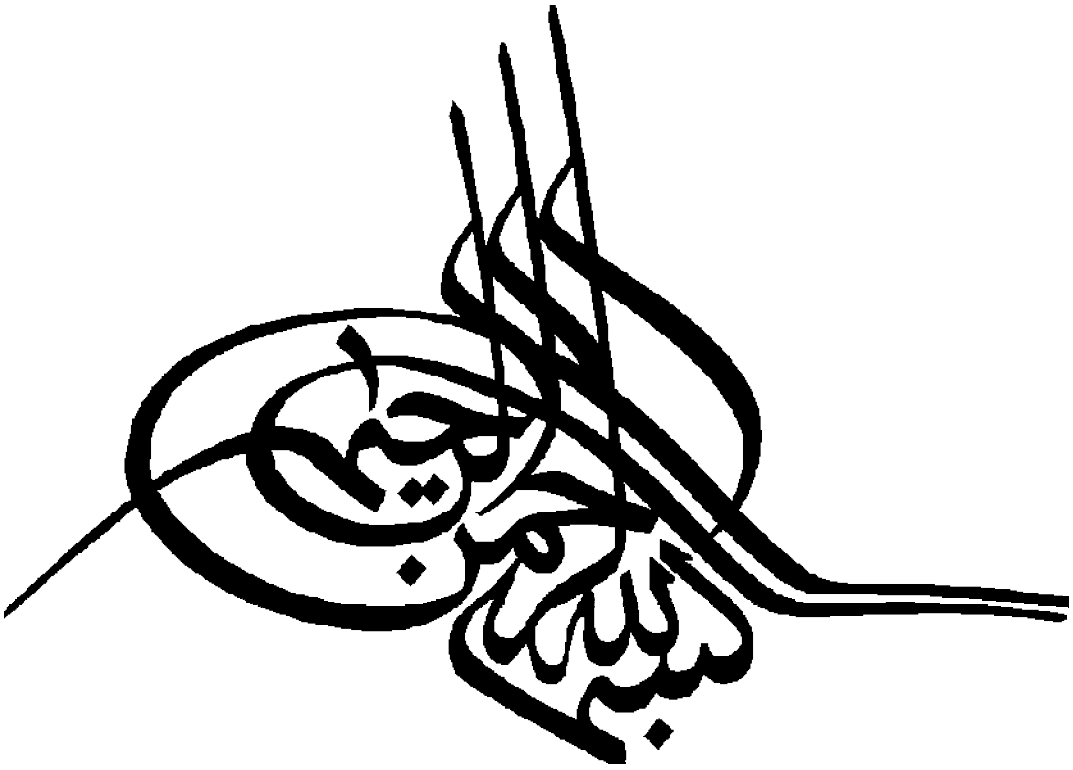

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم اداری و اقتصاد

گروه اقتصاد

پایان نامه‌ی دکتری رشته‌ی علوم اقتصادی گرایش اقتصاد نظری- اقتصاد بخش عمومی

تاثیر نااطمینانی در نرخ یادگیری فنآوریهای انرژی تجدیدپذیر بر ظرفیت تولید برق: نمونه ایران

استادان راهنما:

دکتر علیمراد شریفی

دکتر کیومرث آقایی

استادان مشاور:

دکتر رحیم دلالی اصفهانی

دکتر مهدی صادقی شاهدانی

پژوهشگر:

سعید شوال پور آرانی

مهرماه ۱۳۸۹

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه اصفهان است.

تقدیم به

قلبهای خسته اما همراه

و دیدگان کم سو اما زلال

و دستهای زبر اما گرم

و تقدیم به

فرشته صبر، دلگرمی و امید

پدر، مادر و همسرم

چکیده:

توسعه فناوریهای انرژی تجدیدپذیر، به عنوان راهکاری اساسی در جهت تنوع بخشی به منابع انرژی، جلوگیری از تغییرات سریع آب و هوایی و ایجاد امنیت عرضه انرژی در آینده در کشورهای مختلف در حال توسعه و توسعه یافته مورد توجه قرار گرفته است. روندهای جهانی نشان می دهد که با گسترش کاربرد این فناوریها در سطح دنیا، هزینه ایجاد هر واحد ظرفیت این فناوریها به طور مستمر در حال کاهش است. به عبارت دیگر، «یادگیری از طریق تجربه» موجب شده قدرت رقابت این فناوریها در مقایسه با فناوریهای تولید برق از انرژیهای فسیلی، روز به روز افزایش یابد.

در گذشته، موضوع تغییر و پویایی فناوریهای انرژی تجدیدپذیر در برنامه ریزی بلندمدت بخش برق، عموماً به عنوان عاملی برونزا و به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته می شد. اما به مرور، مطالعات نشان داد که چنانچه موضوع یادگیری از طریق تجربه به عنوان عاملی درونزا در نظر گرفته شود، نتایج به مراتب بهتری حاصل خواهد شد. به این ترتیب به تبعیت از سایر حوزه های مرتبط با فناوری، موضوع یادگیری درونزا بر پایه «منحنی یادگیری» در مدلسازی بخش انرژی مورد توجه قرار گرفت.

عامل مهم دیگر در مدلسازی تغییرات فنی فناوریهای انرژی تجدیدپذیر، نااطمینانی در مورد نرخ یادگیری این فناوریها می باشد. بر خلاف رویکردهای سنتی مبتنی بر تعریف سناریوهای قطعی، در روش برنامه ریزی تصادفی، متغیرهایی که در مورد آنها نااطمینانی وجود دارد به عنوان متغیرهای تصادفی در مدل وارد می شوند که معمولاً دارای یک تابع توزیع احتمال گسسته و معین هستند. به این ترتیب، تابع هدف مساله برنامه ریزی نیز به یک متغیر تصادفی تبدیل می گردد. هدف تحقیق حاضر، ارزیابی تاثیر یادگیری فنی بر ظرفیت بهینه فناوریهای انرژی تجدیدپذیر در افق بلندمدت با لحاظ نااطمینانی در مورد نرخ یادگیری می باشد. در این راستا با استفاده از روش برنامه ریزی خطی تصادفی، یک مدل برنامه ریزی انرژی «پایین به بالا» برای بخش برق ایران در دوره زمانی ۲۰۳۰-۲۰۰۵ طراحی شده است.

نتایج نشان می دهد که یادگیری فنی درونزا، تاثیر قابل ملاحظه ای بر ظرفیت بهینه فناوریهای تجدیدپذیر در آینده داشته و حداکثر ظرفیت بهینه فناوریهای انرژی تجدیدپذیر را تا پایان دوره برنامه ریزی به میزان ۲۸/۶ درصد افزایش خواهد داد. در عین حال، دخالت دولت در نظام قیمت گذاری حامل های انرژی و اختلالات قیمتی ناشی از آن، می تواند تاثیر مثبت مورد انتظار یادگیری فنی بر ظرفیت بهینه فناوریها انرژی تجدیدپذیر را خنثی نماید. همچنین مدلسازی نااطمینانی در نرخ یادگیری موجب می شود مسیر توسعه این فناوریها در آینده بر خلاف سناریوهای بدبینانه و خوش بینانه مسیری میانی بوده و هزینه های بخش برق در این روش، کمتر از روش سناریوهای قطعی شود. یادگیری فنی درونزا همچنین موجب کاهش انتشار آلاینده CO_2 می شود به گونه ای که افزایش نرخ یادگیری می تواند تاثیری مشابه وضع مالیات سبز برای کاهش انتشار آلاینده ها داشته باشد.

کلمات کلیدی: فناوریهای انرژی تجدیدپذیر، یادگیری از طریق تجربه، منحنی یادگیری، یادگیری فنی درونزا، برنامه ریزی تصادفی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلیات تحقیق

۱-۱- شرح و بیان مساله پژوهشی ۱

۱-۲- اهداف تحقیق ۶

۱-۳- اهمیت و ارزش تحقیق ۶

۱-۴- کاربرد نتایج تحقیق ۶

۱-۵- فرضیه ها (در صورت لزوم) یا سوالهای تحقیق ۷

۱-۶- روش تحقیق ۷

۱-۷- جامعه آماری ۱۰

۱-۸- ابزار گردآوری داده ها ۱۱

۱-۹- ابزار تجزیه و تحلیل ۱۱

فصل دوم: ادبیات موضوع و پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه ۱۲

۲-۲- پویایی تغییرات فنی ۱۳

۲-۳- مراحل تغییر فنی و مفهوم چرخه عمر فناوری ۱۴

۲-۴- یادگیری فنی و مکانیزم های آن ۱۸

۲-۵- مبانی نظری یادگیری فنی در اقتصاد ۲۰

۲-۶- منحنی یادگیری ۳۴

۲-۷- پویایی ها و تغییرات فنی در سیستم های انرژی ۳۸

۲-۸- برنامه ریزی بلندمدت بخش انرژی با وجود یادگیری فنی ۴۱

۲-۸-۱- مدلهای برنامه ریزی انرژی و طبقه بندی آنها ۴۱

۲-۸-۱-۱- طبقه بندی بر اساس ساختار مدل ۴۳

۲-۸-۱-۲- طبقه بندی بر حسب رویکرد تحلیلی ۴۴

۲-۸-۱-۳- طبقه بندی بر حسب متدولوژی اصلی ۴۵

۲-۸-۱-۴- طبقه بندی بر حسب رویکرد ریاضیاتی ۴۶

۲-۸-۱-۵- طبقه بندی بر اساس محدوده جغرافیایی تحت پوشش ۴۸

۲-۸-۱-۶- طبقه بندی بر اساس افق زمانی ۴۸

عنوان **صفحه**

۲-۸-۱-۷- طبقه بندی بر اساس بخش های تحت پوشش ۴۹
۲-۸-۱-۸- طبقه بندی بر اساس داده های مورد نیاز ۴۹
۲-۸-۲- برنامه ریزی بلندمدت انرژی با لحاظ یادگیری فنی ۵۰
۲-۸-۲-۱- مدلسازی یادگیری فنی به صورت برونزا ۵۰
۲-۸-۲-۲- مدلسازی یادگیری فنی به صورت درونزا (*ETL*) ۵۰
۲-۸-۳- نااطمینانی در برنامه ریزی بخش انرژی ۵۱
۲-۸-۳-۱- نااطمینانی در مورد نرخ یادگیری فناوریهای انرژی تجدیدپذیر ۵۳
۲-۸-۳-۲- مدلسازی نااطمینانی در نرخ های یادگیری در مدلهای برنامه ریزی انرژی ۵۶
۲-۹- سابقه مطالعات انجام شده ۵۹
۲-۹-۱- مطالعات خارجی ۵۹
۲-۹-۲- مطالعات داخلی ۶۵
۲-۱۰- جمع بندی و نتیجه گیری ۶۸

فصل سوم: روش تحقیق و ابزار تجزیه و تحلیل اطلاعات

۳-۱- مقدمه ۷۰
۳-۲- معیارهای انتخاب مدل ۷۰
۳-۳- معرفی مدل ۷۳
۳-۳-۱- تابع هدف مدل ۷۳
۳-۳-۲- قیود مدل ۷۶
۳-۴- مدلسازی یادگیری فنی ۸۲
۳-۵- مدلسازی نااطمینانی در نرخ یادگیری ۸۶
۳-۶- جمع‌بندی و نتیجه گیری ۸۸
پیوست: روش برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (*MIP*) برای خطی نمودن تابع هدف ۸۹

فصل چهارم: تجزیه و تحلیل الگو

۴-۱- مقدمه ۹۳
۴-۲- معرفی داده ها ۹۴
۴-۲-۱- جایگاه برق در بخش انرژی کشور ۹۴
۴-۲-۲- وضعیت موجود نیروگاههای حرارتی ۹۵

عنوان **صفحه**

۴-۲-۲-۱- نیروگاه‌های بخاری ۹۶
۴-۲-۲-۲- نیروگاه‌های گازی ۹۶
۴-۲-۲-۳- نیروگاه‌های چرخه‌ی ترکیبی ۹۷
۴-۲-۲-۴- نیروگاه‌های دیزلی ۹۷
۴-۲-۳- وضعیت نیروگاههای تجدیدپذیر ۹۷
۴-۲-۳-۱- نیروگاه‌های برقآبی ۹۷
۴-۲-۳-۲- نیروگاه‌های برق بادی ۹۸
۴-۲-۳-۳- نیروگاههای خورشیدی (فتولتائیک) ۱۰۰
۴-۲-۳-۴- انرژی زمین گرمایی ۱۰۱
۴-۲-۴- قیمت گذاری یارانه ای ۱۰۱
۴-۲-۵- سهم بخش برق در انتشار گازهای گلخانه ای ۱۰۲
۴-۳- مدلسازی یادگیری فنی درونزای فناوریهای بادی و فتولتائیک ۱۰۳
۴-۳-۱- تعریف سناریوها ۱۰۳
۴-۳-۲- نتایج اجرای سناریوها ۱۰۵
۴-۳-۲-۱- ظرفیت بهینه فناوریهای انرژی تجدیدپذیر در سناریوهای پایه ۱۰۵
۴-۳-۲-۲- ظرفیت بهینه فناوریهای انرژی تجدیدپذیر در سناریوهای مبتنی بر یادگیری فنی ۱۰۹
۴-۳-۲-۳- انتشار CO_2 بخش نیروگاهی در سناریوهای پایه و مبتنی بر یادگیری فنی ۱۱۴
۴-۴- مدلسازی نااطمینانی در نرخ یادگیری فناوریها ۱۱۷
۴-۴-۱- استخراج مقادیر تابع توزیع احتمال نرخ های یادگیری ۱۱۸
۴-۴-۲-نتایج مدلسازی نااطمینانی در نرخ یادگیری بر ظرفیت بهینه فناوریهای تجدیدپذیر ۱۲۰
۴-۴-۲-۱- نتایج مدلسازی نااطمینانی در ترخ یادگیری فناوری بادی ۱۲۰
۴-۴-۲-۲- نتایج مدلسازی نااطمینانی در نرخ یادگیری فناوری فتولتائیک ۱۲۳
۴-۴-۳- نتایج مدلسازی نااطمینانی در نرخ یادگیری فناوریها بر انتشار CO_2 ..... ۱۲۴
۴-۵- جمعبندی و نتیجه گیری ۱۲۵

فصل پنجم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۵-۱- خلاصه و جمعبندی ۱۲۷
۵-۲- نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات ۱۳۳
۵-۲-۱- ارزیابی فرضیات تحقیق ۱۳۵

عنوان **صفحه**

۵-۲-۲- پیشنهادات..... ۱۳۶
منابع و مآخذ:..... ۱۴۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱). منحنی های هزینه متوسط کوتاه مدت و بازدهی به مقیاس ۲۱
شکل (۲-۲). تغییر فنی و یادگیری ۲۳
شکل (۲-۳). تغییر فنی، یادگیری و کاهش هزینه ۲۴
شکل (۲-۴). منحنی یادگیری فرضی صنعت هواپیماسازی ۲۶
شکل (۲-۵). رابطه یادگیری از طریق تجربه و بازدهی به مقیاس فزاینده ۲۸
شکل (۲-۶). رابطه میان سطح تولید، هزینه کل و سطح تجربه ۲۸
شکل (۲-۷). منحنی یادگیری ۳۶
شکل(۲-۸). نقاط سر به سری و هزینه یادگیری فناوریهای نوظهور ۳۸
شکل (۲-۹). حساسیت منحنی یادگیری به نرخ یادگیری ۵۴
شکل (۲-۱۰). نرخ های یادگیری محاسبه شده برای فناوری بادی ۵۵
شکل (۲-۱۱). نرخ های یادگیری برآورد شده برای فناوری فتولتائیک ۵۶
شکل(۳-۱). بار پایه، ظرفیت ذخیره و بار پیک ۷۹
شکل (۳-۲). منحنی یادگیری و هزینه انباشته ۸۳
شکل (۳-۳). رابطه هزینه انباشته سرمایه گذاری و سرمایه گذاری انباشته ۸۵
شکل (۳-۴). درخت تصمیم گیری ۸۸
شکل (۳-۵). تقریب خطی شکسته از منحنی هزینه تجمعی ۸۹
شکل (۳-۶). نحوه تشکیل قطعات منحنی هزینه انباشته ۹۱
شکل (۳-۷). تقریب خطی از منحنی یادگیری ۹۲
شکل (۴-۱). سهم حامل های مختلف انرژی در عرضه انرژی اولیه در ایران ۹۴
شکل(۴-۲). سهم انواع نیروگاهها از کل ظرفیت نامی نصب شده برق در کشور ۱۳۸۶-۱۳۷۹ ..... ۹۵
شکل (۴-۳). تولید برق نیروگاههای بادی و فتولتائیک در سالهای ۱۳۸۶-۱۳۷۷ ..... ۱۰۰
شکل (۴-۴). مقایسه تعرفه های برق در بخش خانگی و تجاری ایران و سایر کشورها ۱۰۲
شکل (۴-۵). سهم نیروگاههای حرارتی از کل ظرفیت نصب شده در سناریوهای مختلف ۱۰۷
شکل (۴-۶). سهم انواع نیروگاهها از ظرفیت نصب شده با فرض عدم وجود یادگیری فنی ۱۰۹
شکل (۴-۷). تاثیر یادگیری از طریق تجربه بر ظرفیت فناوری بادی ۱۱۰
شکل (۴-۸). تاثیر یادگیری از طریق تجربه بر ظرفیت فناوری فتولتائیک ۱۱۱

عنوان **صفحه**

شکل (۴-۹). ظرفیت نصب شده بهینه توربینهای بادی و فتولتائیک در شرایط یادگیری همزمان ۱۱۱
شکل (۴-۱۰). تاثیر یادگیری فنی بر سهم فناوریهای انرژی تجدیدپذیر در کشور ۱۱۲
شکل (۴-۱۱). تاثیر یادگیری فنی بر سهم فناوریهای انرژی تجدیدپذیر در کشور ۱۱۳
شکل (۴-۱۲). ظرفیت نصب شده بهینه نیروگاههای تجدیدپذیر با فرض یادگیری دورنزا ۱۱۴
شکل (۴-۱۳). میزان تجمعی انتشار CO_2 بخش برق در سناریوهای پایه ۱۱۵
شکل (۴-۱۴). میزان تجمعی انتشار CO_2 بخش برق در سناریوهای یادگیری درونزای فناوری بادی ۱۱۶
شکل (۴-۱۵). میزان تجمعی انتشار CO_2 بخش برق در سناریوهای یادگیری تجمعی فناوری فتولتائیک ... ۱۱۶
شکل (۴-۱۶). میزان تجمعی انتشار CO_2 در سناریوهای یادگیری فنی همزمان فناوری بادی و فتولتائیک ۱۱۷
شکل (۴-۱۷). تابع توزیع احتمال تجمعی منحنی های یادگیری فناوری بادی و مقادیر چارک ها ۱۲۰
شکل (۴-۱۸) تابع توزیع احتمال تجمعی منحنی های یادگیری فناوری فتولتائیک و مقادیر چارک ها ۱۲۰
شکل (۴-۱۹) مقایسه ظرفیت بهینه فناوری توربین بادی با فرض یادگیری تصادفی و سایر سناریوها ۱۲۲
شکل (۴-۲۰) سهم فناوریهای مختلف از کل ظرفیت فناوریهای تجدیدپذیر با فرض یادگیری تصادفی ۱۲۲
شکل (۴-۲۱) ظرفیت بهینه فناوری فتولتائیک با فرض یادگیری تصادفی و سایر سناریوها ۱۲۳
شکل (۴-۲۲). سهم فناوریهای مختلف از کل ظرفیت فناوریهای تجدیدپذیر با فرض نااطمینانی در نرخ یادگیری فناوری فتولتائیک ۱۲۴
شکل (۴-۲۳). انتشار CO_2 در بخش برق با فرض تصادفی بودن نرخ یادگیری فناوری بادی ۱۲۴
شکل (۴-۲۴). انتشار CO_2 در بخش برق با فرض تصادفی بودن نرخ یادگیری فناوری فتولتائیک ۱۲۵
شکل (۵-۱). مقایسه هزینه کل تنزیل شده بخش برق کشور در سناریوهای مختلف ۱۳۶

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱). یادگیری فنی و کاهش هزینه تولید سطح مشخصی از محصول ۲۹
جدول (۲-۲). خلاصه مطالعات مربوط به یادگیری درونزا در مدلهای پایین به بالا ۶۳
جدول (۳-۱). معیارهای انتخاب مدل مناسب تحقیق ۷۱
جدول (۴-۱). برآورد ظرفیت طرح های برق آبی کشور ۹۸
جدول (۴-۲). وضعیت پروژه های بادی کشور در سال ۱۳۸۵ به تفکیک استان ها ۹۹
جدول(۴-۳). مشخصات پروژه های فتولتائیک در حال بهره برداری کشور در سال ۱۳۸۶ ..... ۱۰۱
جدول(۴-۴). میزان انتشار CO_2 نیروگاههای حرارتی در سال ۱۳۸۵ ..... ۱۰۳
جدول (۴-۵). مشخصات سناریوهای تعریف شده برای بررسی تاثیر یادگیری فنی ۱۰۴
جدول (۴-۶). ظرفیت نصب شده و سهم نیروگاههای مختلف در سناریوی مرجع ۱۰۶
جدول (۴-۷). ظرفیت بهینه نیروگاههای غیرحرارتی با فرض عدم وجود یادگیری فنی (گیگاوات) ۱۰۸
جدول(۴-۸). ظرفیت تجمعی بهینه فناوریهای نوین در شرایط عدم وجود یادگیری فنی ۱۰۸
جدول(۴-۹). داده های جدول بندی شده نرخ پیشرفت فنی فناوری بادی ۱۱۸
جدول(۴-۱۰). داده های جدول بندی شده نرخ پیشرفت فنی فناوری فتولتائیک ۱۱۹
جدول(۴-۱۱). نتیجه آزمون نرمال بودن نرخهای پیشرفت فنی فناوریهای بادی و فتولتائیک ۱۱۹

فصل اول
کلیات تحقیق

۱-۱- شرح و بیان مساله پژوهشی

بخش برق یکی از بخش های کلیدی اقتصاد است. توسعه این بخش معیاری برای بهبود رفاه و سطح زندگی مردم به شمار می آید. مصرف سرانه برق یکی از مولفه های «شاخص توسعه انسانی»[1] و «نماگرهای توسعه جهانی»[2] می باشد. به این معنی که ارتباط تنگاتنگی میان دسترسی به برق و میزان رفاه اجتماعی وجود دارد. جایگاه و اهمیت ویژه بخش برق موجب شده سیاستگذاری و برنامه ریزی برای توسعه پایدار این بخش به یکی از وظایف اساسی و مهم دولت در اقتصاد کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته تبدیل گردد. مجموعه مسایل و چالش های پیش روی توسعه این بخش در سطح دنیا موجب ظهور و توسعه ادبیات وسیعی در حوزه برنامه ریزی و سیاستگذاری بخش برق به عنوان یک دانش بین رشته ای[3] شده است. به موازات توسعه مبانی نظری برنامه ریزی و سیاستگذاری در بخش برق و با ظهور روشهای نوین محاسباتی و گسترش دانش نرم افزاری، محققین این حوزه در سطح دنیا کوشیده اند تا با طراحی مدلهای مختلف که ابعاد فنی، اقتصادی و زیست محیطی بخش برق

---

[1] - Human Development Index (HDI)
[2] - World Development Index (WDI)
[3] - Multi disciplinary

را در بر می گیرد، راه را برای ارزیابی تاثیر سیاستگذاریهای مختلف بر سیستم های جهانی، منطقه ای و ملی انرژی هموار سازند.

برنامه ریزی و سیاستگذاری بخش برق در ایران به چند دلیل از اهمیت ویژه برخوردار است. اول آنکه مصرف برق طی سالهای گذشته با نرخ فزاینده ای افزایش یافته است به طوریکه میانگین نرخ رشد سالیانه مصرف این حامل انرژی در کشور در دهه گذشته ۷ درصد بوده است. (وزارت نیرو، ۱۳۸۴) بدون شک تامین نیاز مصرف برق که انتظار می رود در سالهای آینده و به دنبال افزایش جایگزینی سوختهای فسیلی با برق و توسعه زیر ساختهای فنی و رشد جمعیت با روند افزایشی همراه باشد، نیازمند برنامه ریزی مناسب برای توسعه ظرفیت های تولید، انتقال و توزیع می باشد. مساله حایز اهمیت دیگر آنکه بخش برق، یکی از بخش های عمده مصرف کننده فرآورده های نفتی و گاز طبیعی است. روشن است که بی توجهی به امر برنامه ریزی بلندمدت در این بخش و ارائه تصویری مبهم از میزان مصرف سوخت نیروگاهها در آینده، برنامه ریزی برای توسعه تولید و صادرات در بخشهای نفت و گاز و فرآورده های نفتی را نیز با مشکل مواجه خواهد ساخت. با توجه به وجود منابع نفت و گاز در کشور و این واقعیت که درآمد حاصل از صادرات این حامل های انرژی، یکی از منابع اصلی درآمد دولت محسوب می گردد، تدوین برنامه بلندمدت بخش برق در کشور، ارائه تصویری روشنتر از میزان مصرف داخلی نفت و گاز را ممکن خواهد نمود. ویژگی دیگر بخش برق، بالا بودن هزینه های سرمایه ای در این بخش است. واضح است که سیاست گذاری نادرست به ویژه در افق بلندمدت که منجر به انتخاب نادرست فناوریهای تولید گردد، می تواند هزینه های غیر قابل جبرانی را به این صنعت و بر کل اقتصاد تحمیل نماید. توسعه مبادلات برق با سایر کشورها نیز از دیگر مسایل مهم در برنامه ریزی بلندمدت بخش برق کشور می باشد. در حقیقت برای کشورهایی مانند ایران که دارای منابع زیاد گازطبیعی هستند، راهکار تبدیل گازطبیعی به برق و صادرات آن[1] به عنوان یک گزینه جدی قابل مطالعه است. توسعه این روش برای صادرات گازطبیعی که به نوبه خود دارای مزیتهای زیادی در مقابل با صادرات گاز از طریق خط لوله و یا تبدیل آن به LNG می باشد، نیازمند توسعه هدفمند و برنامه ریزی شده ظرفیت های تولید و زیر ساخت های مبادلاتی می باشد. توجه همزمان به مجموعه چالش ها و واقعیت های فوق نیازمند بهره گیری از ابزارهایی است که امکان برنامه ریزی بلندمدت بخش برق را فراهم آورد.

از دیگر سوالات و چالش های عمده پیش روی برنامه ریزی بلند مدت بخش برق در ایران، میزان توجه به تولید برق از محل انرژیهای تجدیدپذیر به جای انرژی فسیلی می باشد. شاید در نگاه اول، به نظر می رسد که با توجه به

[1] - Gas by Wire

وجود منابع غنی سوختهای فسیلی به ویژه گاز طبیعی در کشور و هزینه های بالای تولید برق از محل انرژیهای تجدیدپذیر از جمله انرژی بادی و خورشیدی که به هیچ وجه در شرایط فعلی قابل رقابت با سوخت های فسیلی نیست، جای هیچ گونه تردیدی در مورد اولویت نیروگاههای با سوخت فسیلی در برنامه بلندمدت توسعه بخش برق کشور وجود نداشته باشد. آمارها نشان می دهد که در حال حاضر سهم نیروگاههای دیزلی، بخاری، گازی و چرخه ترکیبی از مجموع ظرفیت نصب شده برق در کشور به ۸۵ درصد بالغ می گردد. از سوی دیگر سهم نیروگاههای برق آبی از کل ظرفیت نصب شده نیز بیش از ۱۴ درصد است. بنابراین سهم انرژیهای تجدیدپذیر از کل ظرفیت تولید برق در کشور به سختی به یک درصد می رسد.(ترازنامه انرژی، ۱۳۸۴) این در حالی است که بر اساس آمارهای جهانی منتشر شده، مجموع ظرفیت نصب شده فناوریهای بادی و خورشیدی در دنیا در انتهای سال ۲۰۰۵ میلای به ترتیب ۵۹۰۰۰ و ۵۴۰۰ مگاوات بوده است. (EIA,2006) واقعیت آن است که بنا به دلایل متعددی از جمله محدودیت منابع سوخت های فسیلی و نگرانی از افزایش آلاینده های زیست محیطی، جهت گیری سیاستی در بسیاری از کشورهای دنیا از جمله کشورهای دارنده منابع انرژی فسیلی، به سمت افزایش سرمایه گذاری در انرژیهای تجدیدپذیر سوق یافته است.

واقعیت های مربوط به تحولات فناوریهای تولید برق از انرژیهای تجدیدپذیر نیز نمایانگر آن است که این فناوریها از بدو ظهور تاکنون به سرعت مسیر توسعه را پیموده اند و هزینه برق تولیدی این فناوریها روندی نزولی را می پیماید. به عبارت صریحتر، این فناوریها نیز با توجه به مفهوم «یادگیری از طریق تجربه[1]» روز به روز در مقایسه با فناوریهای تولید برق از انرژیهای فسیلی قدرت رقابت پذیری بالاتری را کسب می نمایند.

مفهوم «یادگیری از طریق تجربه» را اولین بار، رایت[2](۱۹۳۶) در مطالعه خود در مورد صنعت هواپیمایی مطرح نمود. پس از آن اقتصاد دانانی چون ارو[3](۱۹۶۲)، فوندربرگ و تیرول[4](۱۹۸۳)، داسکوپتا و استیگلیتز[5](۱۹۸۸) به ارزیابی ابعاد نظری و تجربی این مفهوم پرداختند. در مدلهای سیستمی انرژی نیز با توجه به این واقعیت که هزینه متوسط سرمایه گذاری در فناوریهای طرف عرضه و تقاضا در طول زمان در حال تغییر است، مفهوم «یادگیری از طریق تجربه» از آغاز مورد توجه بوده است. لیکن به طور سنتی، تغییر و پویایی فناوریهای بخش انرژی، عموماً به عنوان عاملی برونزا و به عنوان مثال به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته می شد. اما به مرور مطالعات نشان داد که چنانچه موضوع «یادگیری از طریق تجربه» به عنوان عاملی درونزا در نظر گرفته شود، نتایج به مراتب بهتری

---

[1] - Learning by Doing
[2] - Wright
[3] - Arrow
[4] - Fudenberg and Tirole
[5] - Dasgupta and Stiglitz

حاصل خواهد شد. به این ترتیب به تبعیت از سایر حوزه های مرتبط با فناوری، موضوع یادگیری درونزا[1] بر پایه منحنی های یادگیری و یا منحنی های تجربه در مدلسازی بخش انرژی مورد توجه قرار گرفت.

یک منحنی یادگیری به طور عام، یک شاخص عملکرد خاص را به یک تجربه انباشته و اندازه گیری شده به صورت عددی و مقداری مرتبط می سازد. در رایج ترین تعریف از منحنی یادگیری، هزینه متوسط تولید فناوری به عنوان شاخص عملکرد در نظر گرفته می شود و آن را به عنوان تابعی از ظرفیت تجمعی فناوری تعریف می کنند. (Barreto,2001) ظرفیت تجمعی، در واقع به عنوان جایگزینی برای انباشت دانش و یا به عبارتی دانش انباشته شده در نظر گرفته می شود. منحنی یادگیری، نمایانگر این واقعیت است که برخی فناوری ها ممکن است در نتیجه پذیرش گسترده از سوی جامعه و به خاطر انباشت دانش از طریق فرآیندهای «یادگیری از طریق تجربه»، «یادگیری از طریق کاربرد» و «یادگیری از طریق تعامل»، به تدریج با هزینه های کاهنده و نزولی همراه گردند. منحنی یادگیری، بیانگر اثر تغییرات تدریجی و پایدار در فناوری است که مولفه اصلی پیشرفت فنی به شمار می آیند. تغییر فنی به صورت فرآیندی تکاملی و همراه با تلاش های تجربی قابل ملاحظه صورت می گیرد و با رشد ذخیره تجربه و یادگیری توسعه می یابد. (Sahal, 1980)

از جمله فناوریهایی که در سالهای اخیر بواسطه یادگیری فنی توسعه قابل ملاحظه ای یافته است، فناوری توربین بادی می باشد. توربینهای بادی مدرن از دهه ۱۹۴۰ میلادی تاکنون به عنوان یک فناوری تولید برق در دنیا مطرح شده اند. در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی، اولین توربینهای بادی مستقر در دریا نصب شدند. این توربینها به مراتب بهتر از توربینهای بادی مستقر در ساحل و در خشکی بودند. بهبود این فناوری و یادگیری از طریق تجربه در این فناوری، موجب کاهش هزینه و در نتیجه قیمت این توربینها شده است. هزینه واحد سرمایه گذاری در این فناوری در سال ۲۰۰۶ میلادی به ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ یورو بر کیلووات رسید. در همین سال، هزینه واحد توربینهای بادی قابل استقرار در دریا بین ۱۲۰۰ تا ۲۸۰۰ یورو بر کیلووات بود. (GWEC,2006) هزینه تولید برق با استفاده از این فناوری در سال مورد بحث در نواحی با سرعت باد بالا ۴ تا ۵ یوروسنت بر کیلوواتساعت و در نواحی با سرعت باد پایین ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ یورو بر کیلوواتساعت برآورد شده است. (GWEC,2006)

از دیگر فناوریهایی که در سالهای اخیر بواسطه یادگیری فنی رواج قابل توجهی در بازار یافته است سیستم های فتولتائیک می باشد. انواع مختلفی از سیستم های فتولتائیک در طی دهه های گذشته طراحی شده اند. اما از میان این سیستم های مختلف، سیستم های سیلیکونی کریستال بیشتر رواج یافته اند و در حدود ۹۰ درصد از بازار این فناوری را به خود اختصاص می دهند. انتظار می رود در آینده انواع دیگری از این فناوری نیز توسعه یابد و در

[1] - Endogenous Learning

نتیجه طیف فناوریهای فتولتائیک در آینده متنوع تر از امروز خواهد بود. واضح است که مهمترین عاملی که می تواند موجب ورود هر چه بیشتر این فناوریها به بازار شود، کاهش هزینه و قیمت این فناوریهاست. در حال حاضر قیمت این فناوری در بازار حدود ۵ یورو بر وات خورشیدی (W_p) می باشد. (Schaeffer et al., 2004) و هزینه برق تولیدی این فناوری نیز بین ۲۵ تا ۶۵ یوروسنت بر کیلوواتساعت گزارش شده است. (EC, 2005)

نتایج مطالعات نشان می دهد، نرخ یادگیری مربوط به فناوریهای مختلف بسته به روش مورد استفاده برای محاسبه و مدلسازی آن متفاوت است. به عنوان نمونه، مطالعه مک دونالد و شراتن هولزر[1] (۲۰۰۱) نشان می دهد که نرخ یادگیری مربوط به توربینهای بادی در مطالعات مختلف بین ۸ تا ۱۸ درصد، برآورد شده است و در مورد سایر فناوریهای انرژیهای تجدید پذیر نیز شرایط مشابهی حاکم است. با توجه به وجود این گونه اختلافات در مورد نرخ یادگیری و با توجه به جایگاه مهم این نرخ در سیاستگذاری برای توسعه یک فناوری به طور خاص و سیاستگذاری بخش انرژی به طور عام، می توان نتیجه گرفت که یکی از حوزه های مهم نااطمینانی در مدلسازی بخش انرژی، نااطمینانی در مورد نرخ یادگیری فناوریهای مختلف می باشد.

البته باید اذعان نمود که موضوع نااطمینانی در برنامه ریزی بخش انرژی منحصر به حوزه فناوری و منحنی یادگیری نیست. بلکه متغیرهایی از جمله میزان مصرف برق و قیمت حامل های انرژی در آینده و یا میزان انتشار گازهای گلخانه ای و محدویت های نهادهای نظارتی بین المللی و ملی برای انتشار نیز از جمله متغیرهایی هستند که در سالهای گذشته توجه مدلسازان و برنامه ریزان بخش انرژی را به خود جلب نموده اند.

با عنایت به مجموعه مسایل فوق، شاید بتوان بی توجهی به توسعه فناوریهای تولید برق از انرژیهای تجدیدپذیر را ناشی از نوعی نااطمینانی از یادگیری این فناوریها در آینده به طور عام و نااطمینانی از نرخ یادگیری آنها به طور خاص دانست. در این مطالعه تلاش می شود تا با بهره گیری از تجارب و روشهای برنامه ریزی بخش برق در دنیا در شرایط وجود نااطمینانی، به برخی سوالات اساسی پیش روی توسعه بخش برق در کشور پرداخته شود. از جمله اینکه اصولاً در شرایطی که از یک سو، لااقل در افق میان مدت مشکلی از نظر تامین سوخت مورد نیاز نیروگاههای فسیلی در کشور وجود ندارد و از سوی دیگر فناوریهای انرژیهای تجدیدپذیر توان رقابت با فناوریهای انرژی فسیلی را دارا نیستند و نوعی نااطمینانی از نرخ یادگیری این فناوریها در سطح جهانی و در داخل کشور وجود دارد، چه سیاستی می بایست در جهت توسعه فناوریهای انرژی تجدید پذیر در کشور اتخاذ شود و میزان سرمایه گذاری مناسب برای توسعه این فناوریها در کشور به چه میزان است؟

---

[1]- McDonald and Schrattenholzer

۱-۲- اهداف تحقیق

هدف اصلی تحقیق حاضر، تعیین میزان سرمایه گذاری بهینه در ظرفیتهای نیروگاهی تجدیدپذیر در کشور در افق بلندمدت باتوجه به وجود نااطمینانی در نرخ یادگیری فناوریهای مزبور است. در این راستا، ضمن تبیین مفهوم «یادگیری از طریق تجربه» به طور عام و کاربرد آن در مورد فناوریهای برق تجدیدپذیر، با استفاده از یک مدل پایین به بالا، تاثیر پدیده «یادگیری از طریق تجربه» در فناوریهای مزبور بر میزان ظرفیت بهینه این فناوریها و سرمایه گذاری مورد نیاز برای توسعه این ظرفیت، در افق بلندمدت ارزیابی خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه از یک سو نرخ یادگیری مولفه اصلی تعریف یک منحنی یادگیری می باشد و از سوی دیگر این نرخ در مورد فناوریهای برق تجدیدپذیر با نااطمینانی همراه است، با دو رویکرد طراحی سناریوهای مبتنی بر پیش بینی قطعی و رویکرد حداقل سازی زیان هزینه انتظاری، تاثیر این نااطمینانی بر برنامه ریزی بلندمدت بخش برق ارزیابی خواهد شد.

۱-۳- اهمیت و ارزش تحقیق

انجام این تحقیق به دلایل زیر ضروری است:

الف- بخش برق یکی از بخش های مهم و حیاتی در فرآیند توسعه اقتصادی است و توسعه نامتوازن این بخش، هزینه های سنگینی را بر اقتصاد تحمیل می نماید. یکی از عواملی که برنامه ریزی برای توسعه این بخش را با مشکل همراه می سازد، نااطمینانی سیاست گذاران در مورد نرخ یادگیری فناوریهای مختلف به ویژه فناوریهای انرژی تجدیدپذیر می باشد. لذا توسعه روشهایی برای مدلسازی نااطمینانی در بخش برق ضروری است.

ب- بخش برق کشور با کمبود جدی منابع مالی مواجه است. از سوی دیگر سرمایه گذاری در این بخش برگشت ناپذیر است. در این شرایط هر نوع تصمیم نادرست در مورد روند توسعه این بخش و نوع فناوریهای مورد نیاز در آینده، می تواند زیان های جبران ناپذیری را به این بخش و به اقتصاد کشور تحمیل نماید.

۱-٤- کاربرد نتایج تحقیق

مهمترین نتیجه تحقیق حاضر، تدوین الگویی برای برنامه ریزی بلندمدت بخش برق کشور در مواجهه با نااطمینانی در مورد نرخ یادگیری فناوریهای انرژیهای تجدیدپذیر می باشد. از دیگر نتایج این تحقیق عبارتند از:

- ارزیابی تاثیر مفهوم «یادگیری از طریق تجربه» بر انتخاب فناوریهای انرژیهای تجدیدپذیر و تلاش در جهت افزایش سهم این انرژیها در طرفیت نصب شده برق کشور

- ارزیابی تاثیر نااطمینانی در نرخ یادگیری فناوریهای انرژیهای تجدیدپذیر بر روند آتی توسعه بخش برق در کشور

- تعیین «میزان سرمایه گذاری لازم» در جهت توسعه فناوریهای انرژیهای تجدید پذیر در کشور با توجه به روندهای جهانی

۱-۵- فرضیه ها (در صورت لزوم) یا سوالهای تحقیق

- پدیده «یادگیری از طریق تجربه»(Learning By Doing) سهم فناوریهای برق تجدیدپذیر از کل ظرفیت تولید برق در کشور را افزایش می دهد.

- نااطمینانی در مورد نرخ یادگیری فناوریهای برق تجدیدپذیر، هزینه کل بلندمدت بخش برق در کشور را افزایش می دهد.

۱-٦- روش تحقیق

با توجه به رشد روز افزون اقتصاد و نقش پیچیده انرژی در این زمینه، تصمیم گیری و سیاست گذاری در بخش انرژی به سادگی امکانپذیر نیست. از سوی دیگر با توجه به نقش و جایگاه مهم انرژی به عنوان یکی از نهاده های اصلی تولید در فرآیند رشد و توسعه اقتصادی، هرگونه تصمیم گیری در این زمینه، مولفه های عمده اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و... را تحت تاثیر قرار خواهد داد. موضوع ارتباط بخش انرژی با سایر بخش های اقتصادی و اثر آن بر رشد و توسعه اقتصادی از اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی و با بروز بحران نفتی در دنیا بیشتر مورد توجه قرار گرفت. در این هنگام کشورهای توسعه یافته به مطالعه روش‌های کاهش وابستگی اقتصاد به انرژی های فسیلی روی آوردند. با این هدف، مدل های بسیاری در زمینه انرژی و تعاملات آن با اقتصاد طراحی شد. به مرور زمان با افزایش مصرف انرژی و اثرات زیست محیطی آن، توجه مدل سازان انرژی به اثرات همزمان انرژی، اقتصاد و مسائل زیست محیطی جلب شد. به طوری که امروزه اغلب مدل های برنامه ریزی انرژی، قابلیت ارزیابی همزمان و یکپارچه مسائل مربوط به انرژی از قبیل عرضه، تقاضا و قیمت های انرژی، اقتصاد و اثرات زیست محیطی را دارا می باشند.(Goldstain et al., 2001)